



# Imagerie par résonance magnétique

*Denis Royer*  
*Docteur ès-sciences physiques*  
*Ancien ingénieur au Commissariat à l'Energie Atomique*



Fondation ARSEP  
PARIVRY  
14 rue Jules Vanzuppe  
94200 Ivry sur Seine

[www.arsep.org](http://www.arsep.org)  
reconnue d'utilité publique

# IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE ET SCLEROSE EN PLAQUES

*Denis Royer*

*Docteur ès-sciences physiques*

*Ancien ingénieur au Commissariat à l'Energie Atomique*

## 1. Introduction à l'IRM

- 1.1. Qu'est-ce que l'aimantation ?
- 1.2. La résonance magnétique des protons
- 1.3. « Manipulation » des spins et résonance magnétique
- 1.4. De la résonance magnétique à l'IRM
  - 1.4.1. La tomographie
  - 1.4.2. Le renforcement des images
- 1.5. La sécurité

## 2. IRM et SEP

- 2.1. L'IRM conventionnelle
- 2.2. Diagnostic de la SEP
- 2.3. Evolution et pronostic
- 2.4. Nouvelles techniques d'IRM
  - 2.4.1. La spectroscopie
  - 2.4.2. Le transfert d'aimantation
  - 2.4.3. L'IRM de diffusion
  - 2.4.4. L'IRM fonctionnelle

## Glossaire

### *Avant-propos*

*Depuis son apparition, l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) a grandement contribué à la connaissance des maladies du cerveau, et notamment de la Sclérose en Plaques.*

*Cette technique reste cependant un domaine de spécialistes et soulève de nombreuses questions de la part des malades : comment cela marche-t-il ; y-a-t-il des inconvénients à pratiquer ces examens ; quels renseignements fournissent-t-ils sur ma maladie ? Quelques interrogations parmi tant d'autres.*

*Ce document est destiné à renseigner les malades et leurs familles sur ces techniques. On y trouvera les éléments nécessaires à la compréhension des principes de bases de l'IRM, suivis d'un état de la pratique actuelle en milieu hospitalier et d'une revue des principaux développements en cours dans le domaine de la recherche.*

*Nous espérons ainsi contribuer à un dialogue informé et de qualité des malades avec leurs médecins.*

*Remerciements : L'auteur tient à remercier le Docteur Emmanuelle Plassart-Schiess de l'ARSEP, à l'initiative du projet, qui l'a porté jusqu'à sa version finale, les Professeurs Isabelle Berry et Jean Pelletier pour la relecture attentive du manuscrit et la fourniture des images illustratives.*

*Crédit photos : Les photographies et images IRM proviennent, sauf indiqué, du CRMBM CNRS6612 CHU La Timone Marseille.*

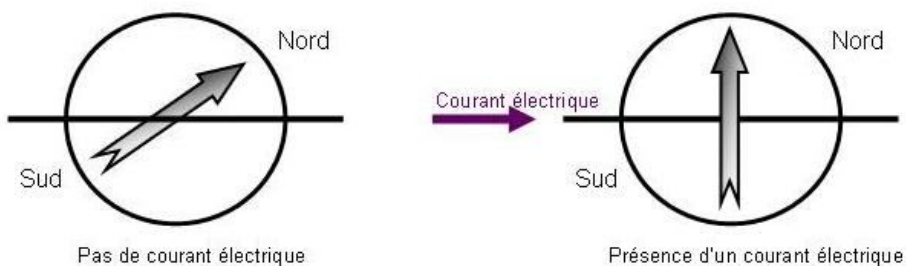
# 1. Introduction à l'IRM

## 1.1. Qu'est-ce que l'aimantation ?

Une manifestation immédiate du magnétisme naturel est la déviation de la boussole aimantée dans le champ magnétique terrestre. Ce n'est qu'en 1820 qu'Oersted mit en évidence l'association d'un courant électrique avec le magnétisme.

Un conducteur électrique, une spire, un bobinage parcourus par un courant électrique créent dans leur environnement un champ magnétique détectable par l'orientation de l'aiguille d'une boussole. Le champ magnétique peut être à volonté modulé ou pulsé par le courant électrique, ouvrant ainsi toutes les applications que nous connaissons : moteurs électriques, électroaimants, relais électriques etc.

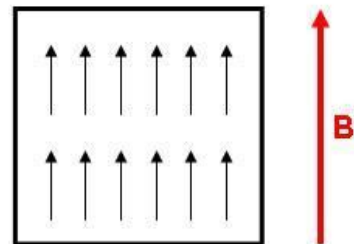
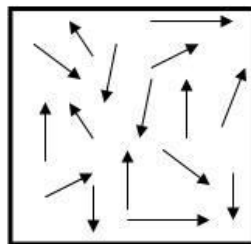
### Orientation de la boussole en fonction d'un courant électrique



**Légende :** En absence de courant électrique, l'aiguille de la boussole s'oriente dans le sens Nord – Sud, sous l'effet du champ magnétique terrestre. Sous l'effet d'un courant électrique, l'axe de l'aiguille change d'orientation.

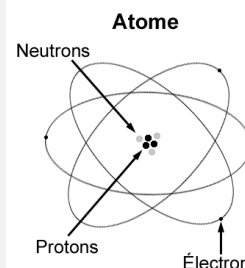
Le champ magnétique influe aussi sur le comportement de la matière. Sous l'angle du magnétisme, on peut voir la matière comme constituée de nombreuses petites aiguilles de boussole, chacune avec sa propre aimantation. Le champ magnétique externe produit un effet sur l'orientation (et quelquefois l'intensité) de ces aimants microscopiques. La combinaison des aimantations microscopiques produit l'aimantation macroscopique de la matière.

**Légende :** En l'absence de tout champ magnétique, les aiguilles s'orientent aléatoirement. Lorsqu'un champ magnétique  $B$  est appliqué, les aiguilles s'orientent dans la direction du champ.



### Définitions :

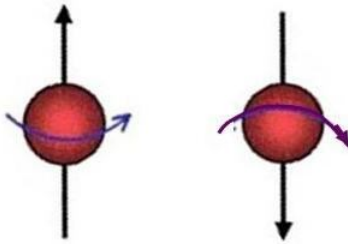
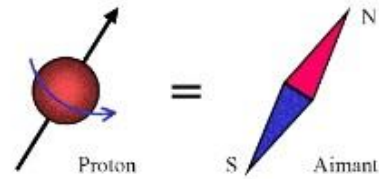
- un **atome** est la plus petite partie indivisible d'un corps simple. Il est généralement constitué d'un noyau composé de **protons** et de **neutrons** autour desquels se trouvent des **électrons**.
- **proton** : particule possédant une charge électrique de signe positif
- **neutron** : particule neutre qui n'a pas de charge électrique
- **électron** : particule possédant une charge électrique de signe négatif.



Les aimantations microscopiques sont de plusieurs origines :

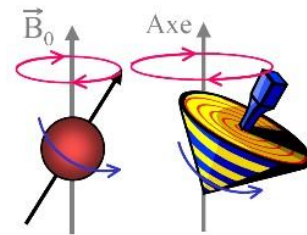
- mouvement orbital des électrons autour des noyaux dans les atomes,
- spin des électrons (voir plus loin),
- mouvement et spin des protons et des neutrons dans les noyaux atomiques.

Le **spin** est une propriété des particules atomiques. On peut la représenter classiquement comme la rotation des particules sur elles mêmes (tout comme la terre tourne sur elle même en 24 heures). Ce mouvement produit une aimantation parallèle à l'axe de rotation (schématisé ci-contre). Mais ce n'est qu'une analogie, car la mécanique au niveau microscopique est très différente de la mécanique classique.



Une propriété fondamentale du spin des électrons et des protons est de ne posséder que deux états possibles : « vers le haut » et « vers le bas ». Ces deux états sont énergétiquement différents : il faut fournir une certaine quantité d'énergie pour passer de l'un à l'autre.

L'autre propriété qui nous intéresse est la **précession** : sous l'influence du champ magnétique externe, les spins tournent autour de leur axe  $B_0$  (en formant un cône, comme une toupie) avec une fréquence (mesure le nombre de fois où un phénomène périodique se reproduit par unité de temps). Cette fréquence est d'autant plus élevée que l'intensité du champ magnétique est grande. On l'appelle **fréquence de résonance**.

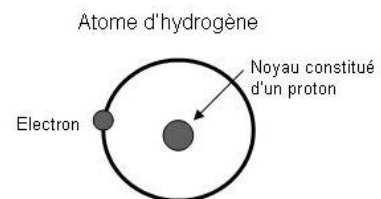


Si une onde électromagnétique de cette fréquence de résonance est appliquée, la quantité d'énergie apportée permet aux spins de basculer d'un état « bas » vers un état « haut » par effet de résonance. Cet effet permet de manipuler les spins à volonté, et ouvre la voie aux techniques de la **résonance magnétique**.

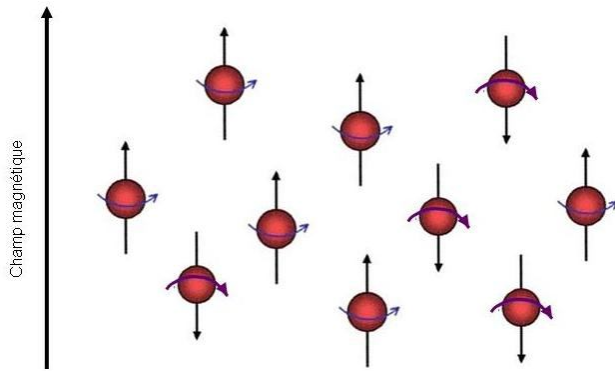
**Définition** : La résonance est une absorption d'énergie par un système à une fréquence déterminée. Par exemple, elle permet d'expliquer le bris d'un verre en cristal sous l'effet de certaines notes émises par une personne. La résonance est un phénomène qui peut être utilisé ou subit.

## 1.2. La résonance magnétique des protons

La résonance magnétique des protons est le phénomène utilisé dans l'IRM. Les molécules d'eau, en grande quantité dans les tissus biologiques, contiennent des atomes d'hydrogène dont le noyau est constitué d'un seul proton. Le corps humain contient environ 70% d'eau, ce qui rend possible l'utilisation de la résonance magnétique sur les protons.

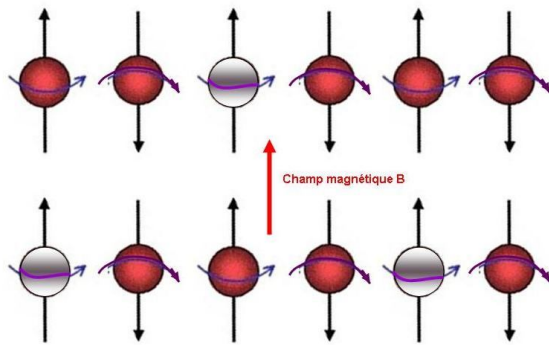
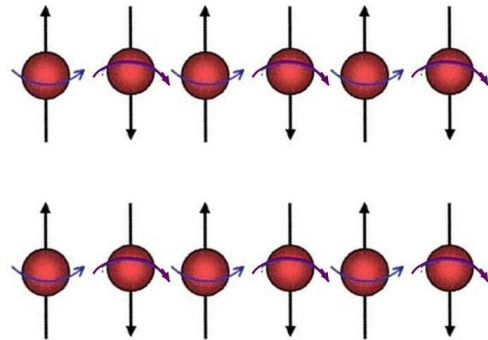


Orientation des spins sous l'effet d'un champ magnétique



Lorsqu'un tissu biologique est soumis à un champ magnétique, la population des spins est modifiée. Une partie des spins s'oriente parallèlement au champ magnétique, tandis qu'une autre partie s'oriente en sens contraire. Plus exactement, l'axe des spins tourne autour de la direction du champ magnétique avec une fréquence déterminée par l'intensité du champ et la nature de la molécule, ici l'eau, dans laquelle se trouvent les atomes d'hydrogène.

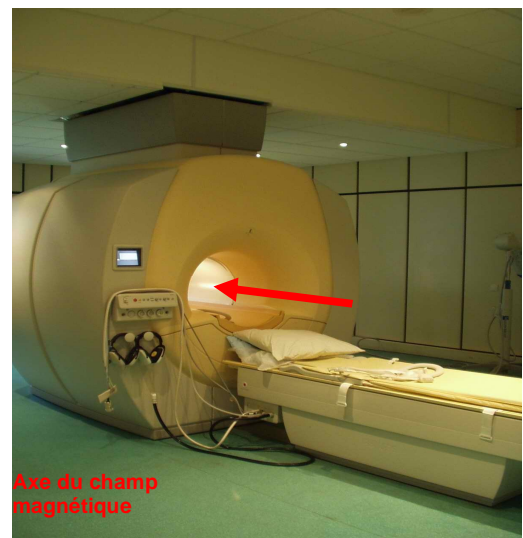
Regardons plus en détail l'effet du champ magnétique. En l'absence de champ, la moitié des spins sont dirigés « vers le haut » et l'autre « vers le bas ». L'aimantation résultante qui est la somme des aimantations individuelles est nulle.



En présence d'un champ magnétique un déséquilibre se produit, résultant en une aimantation de direction parallèle à celle du champ. Cependant, à la température du corps humain, le nombre de protons à l'origine de cette aimantation est petit (de l'ordre de un pour un million) et l'aimantation résultante est faible et pratiquement indétectable directement. On verra comment la technique de la résonance magnétique permet de la mesurer.

L'élément principal d'un scanner IRM est un puissant aimant qui produit le champ magnétique permanent.

Il est constitué d'un bobinage d'axe horizontal autour d'un tunnel où prend place le patient. Cette bobine, constituée d'un métal **supraconducteur**, est plongée dans un réservoir rempli d'hélium liquide à 4 Kelvin soit  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Le courant électrique qui la parcourt peut être très intense car il ne subit pas de résistance et subsiste tant que la bobine est refroidie. Cette technologie permet d'atteindre des champs magnétiques très élevés, de 1,5 ou 3 **Tesla** (T) dans le matériel hospitalier et jusqu'à 10 T et plus dans les appareils expérimentaux.



**Légende:** Vue du tomographe IRM et de la direction du champ magnétique principal



**Légende :** Tomographe IRM de 3 et 1,5 Tesla du CRMBM au CHU Timone Marseille

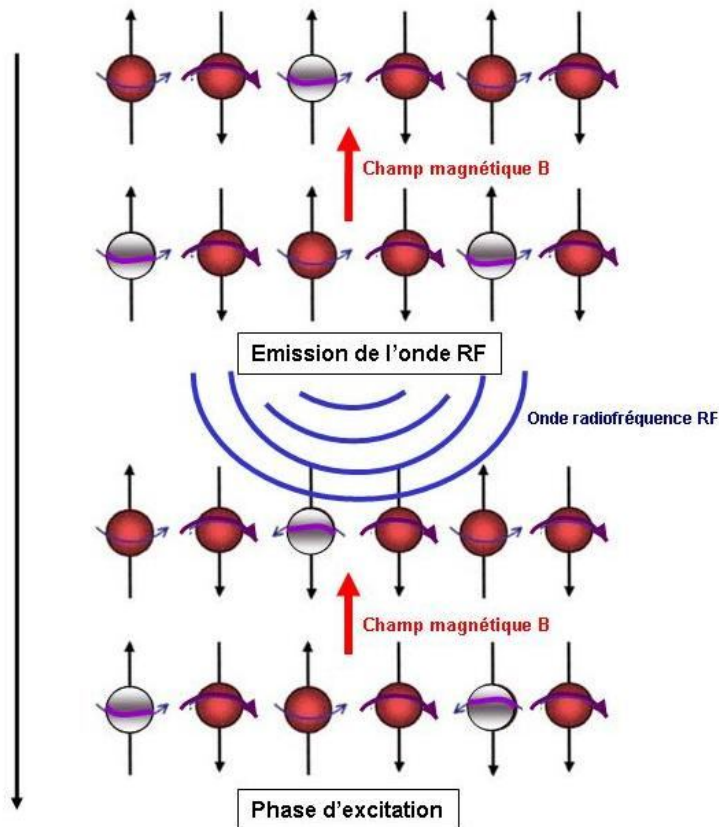


### 1.3. « Manipulation » des spins et résonance magnétique

L'état de l'ensemble de spins peut être modifié au moyen d'une onde, appelée **onde radiofréquence (RF)** de fréquence identique à la fréquence de précession. L'énergie délivrée par l'onde RF a pour effet de basculer certains spins de l'état aligné vers l'état anti-aligné.

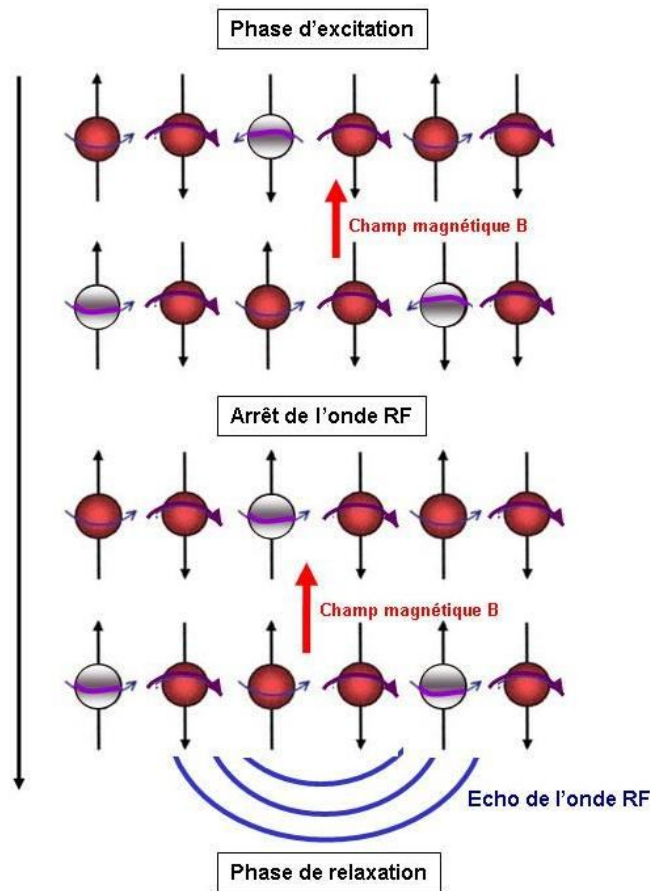
Avant l'application de l'onde RF, les spins étant alignés, l'aimantation est maximale. Avec le basculement, l'aimantation nette diminue jusqu'à s'annuler, puis à changer de direction si l'énergie RF est suffisante.

#### Phase de déséquilibre en présence d'un champ magnétique



**Légende :** Sous l'effet de l'onde radiofréquence, l'état de certains spins a changé : ils sont passés d'une orientation identique au sens du champ magnétique à une orientation opposée au sens du champ magnétique.

A partir de cet état, lorsque l'excitation de l'onde RF est arrêtée, les spins reviennent progressivement à leur état initial en restituant de l'énergie. Cette énergie est transformée sous la forme d'une onde de même fréquence que l'onde RF d'excitation. Ce phénomène se nomme **relaxation** et il est à la base des mesures de résonance magnétique.



**Légende :** Lorsque l'émission de l'onde RF est arrêtée, le système retourne à son état d'origine en restituant l'énergie émise sous la forme d'un signal RF.

L'examen IRM consiste à mesurer l'énergie qui va être émise en retour et à déterminer la vitesse (ou le temps) de décroissance de cette émission. L'information est ensuite traduite en niveaux de contraste dans l'image IRM.

Comme il a été dit précédemment, la seule relaxation longitudinale (parallèle au champ magnétique) n'est pas détectable directement. Or l'onde RF a aussi pour effet de modifier l'orientation de l'aimantation. Celle-ci peut être amenée dans une direction perpendiculaire à celle du champ principal. Dès la cessation de l'excitation RF cette aimantation transversale (perpendiculaire au champ magnétique) décroît avec une constante de temps propre. Le signal émis, qui contient à la fois l'information de relaxation longitudinale et transversale, peut être détecté par une antenne réceptrice.

Ces deux types de relaxation sont caractérisés par deux constantes de temps de décroissance nommées **T1** et **T2** ou encore « longitudinale » (parallèle au champ magnétique) et « transversale » (perpendiculaire au champ magnétique). Les mécanismes de ces deux types de relaxation sont très différents et la proportion relative T1/T2 permet d'identifier la nature ou la condition du tissu biologique concerné (graisses, sang, liquide céphalo-rachidien, squelette).

Le prescripteur de l'examen et l'opérateur ont à leur disposition divers moyens pour favoriser tel ou tel type de relaxation et obtenir des images dites **pondérées** en T1 ou en T2 (il existe aussi une pondération qui donne une mesure de la **densité de protons**). Ces ensembles de réglages sont appelés **séquences**. Une séquence T1 fournira une image dont le contraste sera lié aux différences de relaxation longitudinale, et une séquence T2 aux différences de relaxation transversale.

Comment cette « manipulation » des spins est-elle obtenue dans la pratique ? Dans les scanners IRM les plus récents, une antenne intégrée à l'appareil est chargée d'émettre l'énergie RF nécessaire dans tout le volume du tunnel, tandis qu'une antenne réceptrice est placée à proximité de la zone à examiner. Cette dernière est chargée de mesurer l'énergie réémise par les spins lors de leur relaxation.

Pour un champ magnétique de 1,5 T, la fréquence de résonance est de 63 mégahertz (soit environ la moitié de la fréquence des ondes de la radio FM) et la puissance nécessaire afin d'obtenir une excitation suffisante des spins est de plusieurs kilowatts.

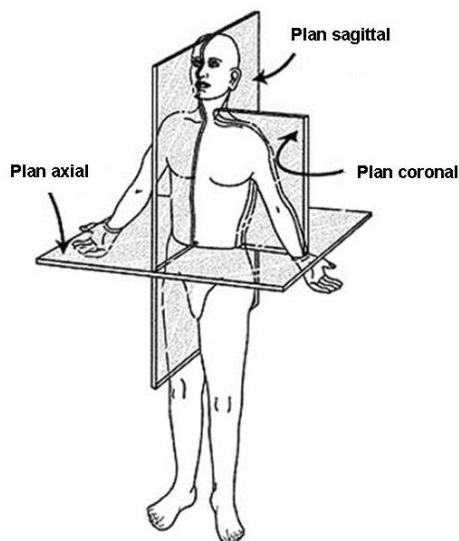
## 1.4. De la résonance magnétique à l'IRM

### 1.4.1. La tomographie

Ce qui a été dit précédemment est valable pour un petit volume de tissu biologique (que l'on appelle **voxel**). L'obtention d'images d'organes ou du corps entier nécessite des techniques et traitements informatiques qui sont mis en œuvre dans le **scanner** ou **tomographe IRM**.

Le cadre de cet exposé ne permet pas d'entrer dans le détail de ces techniques.

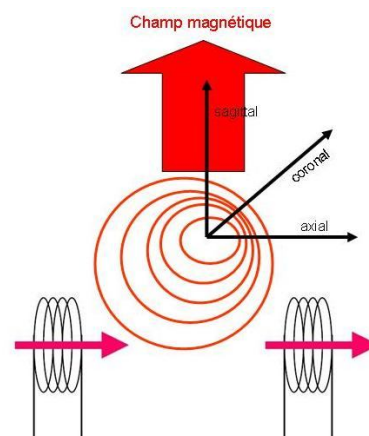
Néanmoins, il faut savoir que le volume à examiner est balayé par tranches successives, selon trois directions perpendiculaires nommées axiale, sagittale et coronale.



**Légende :** Définition des coupes sagittale, coronale et axiale et image IRM en coupe sagittale

Avec les appareils hospitaliers actuels, l'épaisseur des tranches est de 3 mm, ce qui revient à dire que l'on ne peut distinguer aucun détail de taille inférieure à 3 mm.

Le principe du balayage est de sélectionner la tranche à examiner en fonction de sa fréquence de résonance propre. Cette fréquence est imposée par une variation du champ magnétique le long d'une direction de l'espace définie par l'opérateur. Pour cela l'aimant principal du scanner IRM est complété par des bobinages qui créent des variations du champ magnétique (de l'ordre du milli-tesla par mètre) dans les trois directions de l'espace. Ces bobinages sont parcourus par des courants électriques pulsés.



Bobinage entraînant une variation du champ magnétique

Le bruit entendu par le patient pendant l'examen est dû aux forces créées dans les structures de l'appareil lors des variations rapides de courant dans ces bobines.

#### 1.4.2. *Le renforcement des images*

L'examen IRM classique ne nécessite pas de préparation ni d'injection de produit de contraste comme c'est souvent le cas en radiographie X. Cependant d'importantes informations complémentaires peuvent être obtenues en IRM par l'injection de produits de contraste spécifiques.

Les molécules des produits utilisés ne produisent pas elles-mêmes de signal de résonance, mais agissent sur le signal des protons voisins à travers l'aimantation locale qu'elles portent. L'élément le plus utilisé en neuroimagerie est le gadolinium (symbole Gd) sous forme de composé non toxique et éliminable.

### 1.5. *La sécurité*

Bien que le procédé de l'IRM n'utilise pas de rayonnement ionisant, la mise en œuvre de champs magnétiques et d'ondes de radiofréquence puissants comporte des dangers spécifiques. Ces dangers sont maîtrisés par des mesures de précaution dans les zones d'examen ainsi que par le respect des normes d'exposition des patients et des opérateurs. En présence de l'aimant, tout objet métallique ferromagnétique peut être violemment attiré, et créer par impact des dégâts considérables. Il convient donc d'éliminer de la zone les mobiliers ou objets usuels (tels que clés, montres etc.) en acier ou alliage ferromagnétique. Lors de la procédure d'accès, le patient sera interrogé sur le port éventuel de stimulateur cardiaque, implant métallique, ressort vasculaire et prothèses diverses qui constituent des contre-indications à l'examen.

La puissance des ondes radiofréquences utilisées a pour effet d'échauffer les tissus biologiques par absorption d'énergie. Des limites d'exposition ont été établies (directive européenne 2004/40/CE) en terme de Débit d'Absorption Spécifique (DAS). Ces débits sont surveillés lors de l'examen et tout dépassement est limité par les sécurités de l'appareil. A noter également un autre danger lié à l'utilisation de l'agent de contraste au gadolinium. Le gadolinium est utilisé sous forme de composés non toxiques (des chélates) qui s'éliminent en quelques heures par voie urinaire. L'insuffisance rénale peut être la cause d'une mauvaise élimination et constitue aussi une contre-indication.

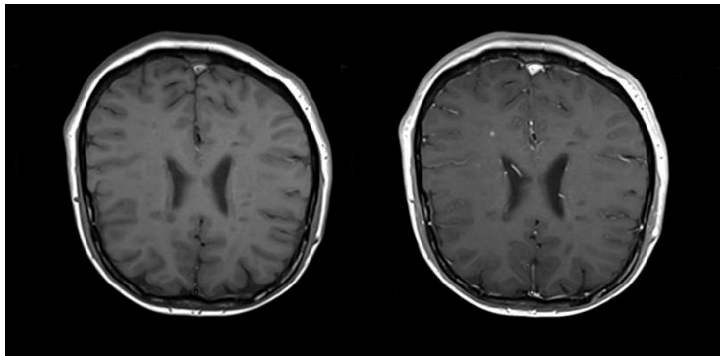
## 2. IRM et SEP

### 2.1. *L'IRM conventionnelle*

La perte de la gaine de myéline qui entoure les axones des neurones est à l'origine des déficits caractéristiques de la SEP. La myéline étant une graisse hydrophobe (elle est soluble dans les corps gras mais insoluble dans l'eau), les faisceaux de fibres nerveuses sont pauvres en eau et donc peu visibles à l'IRM. La démyélinisation a pour effet de créer des zones riches en eau qui deviennent visibles. C'est la principale raison de l'efficacité de l'IRM comme outil d'investigation dans la SEP.

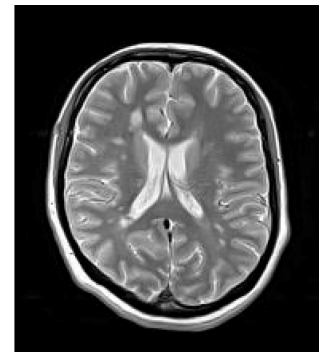
**Définition :** Les contrastes observés en IRM sont la traduction en niveaux de gris du signal émis lors de la relaxation. Ce signal est uniquement dû à l'aimantation transversale (perpendiculaire au champ magnétique). En effet, l'aimantation longitudinale (parallèle au champ magnétique) donne un signal négligeable par rapport au champ magnétique imposé (qui est élevé). Le blanc correspond à un signal élevé donc à un hyper-signal. Le noir correspond à un faible signal donc à un hypo-signal. Lors de l'acquisition des images, le signal va dépendre de la densité des protons.

L'examen IRM classique dans le cas de la SEP consiste à réaliser des images pondérées en T1 et en T2, et des images pondérées en T1 renforcées par une injection de gadolinium. Les lésions SEP présentent des caractéristiques biologiques différentes selon les stades d'évolution. Ces différences vont permettre de les différencier à l'IRM.



**Légende :** Plaques SEP en pondération T1 (à gauche) et T1 renforcé après injection de Gadolinium (à droite). L'injection de l'agent de contraste permet d'identifier des lésions de la barrière hémato-encéphalique invisibles en T1.

**Légende :** Plaques SEP en pondération T2. Le contraste est inversé, la matière blanche apparaissant en gris. Les images T2 font apparaître des lésions jeunes au stade inflammatoire (hypersignaux en blanc).



Aux stades inflammatoires ou en présence d'œdème, les lésions seront caractérisées par une grande mobilité des protons. Elles auront un temps de relaxation transversale (T2) long et seront visibles principalement en pondération T2 (lésions hyper-intenses). Les états de démyélinisation non inflammatoires ou de perte axonale seront caractérisés par une mobilité des protons encore accrue et des temps de relaxation longitudinale (T1) et transversale (T2) très longs. Elles seront hypo-intenses en pondération T1 et apparaîtront comme des spots sombres dans la substance blanche (on parlera de « trous noirs »).

L'examen avec injection de gadolinium est spécifique de la recherche de rupture de la barrière hémato-encéphalique (BHE, barrière sang-cerveau). Cet événement est considéré comme une porte par laquelle les cellules du système immunitaire pénètrent dans le cerveau et s'attaquent à la myéline. Le produit de contraste une fois injecté par voie intraveineuse circule dans le système vasculaire cérébral et rend visibles les régions lésées de la BHE sur les images pondérées en T1.

## 2.2. Diagnostic de la SEP

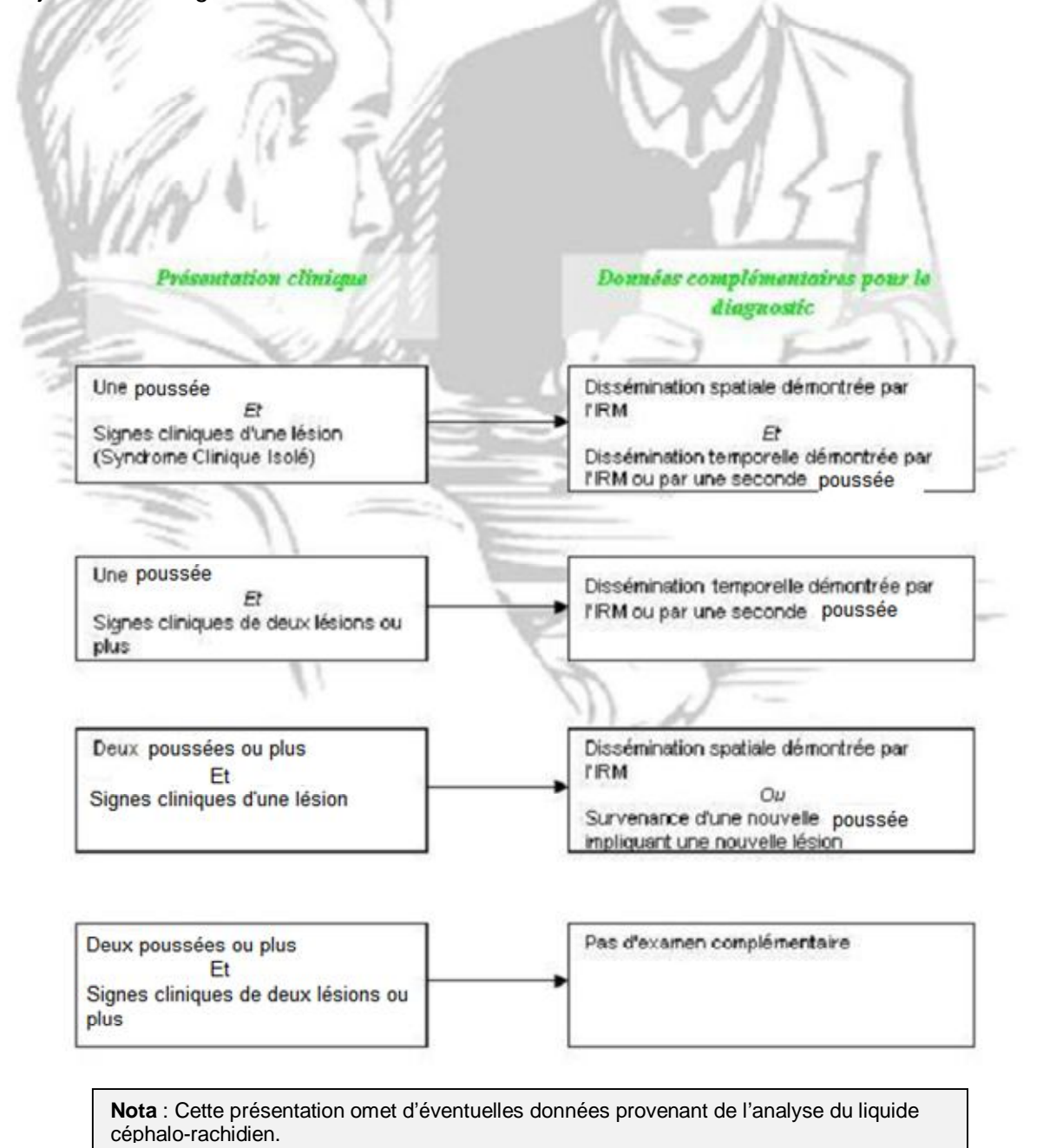
Le diagnostic de la SEP a longtemps été fondé sur de seuls critères cliniques. Depuis l'arrivée de l'IRM, de nouveaux marqueurs ont permis de compléter les critères cliniques pour la pose du diagnostic de la SEP. Ces marqueurs sont essentiellement le nombre et la localisation des lésions, ainsi que leur activité.

La présence de lésions isolées sur l'image IRM n'a aucune valeur diagnostique. Des images ressemblantes peuvent apparaître avec l'âge et être observées chez des sujets sains. Seul un tableau clinique et d'imagerie remplissant un ensemble de critères établis par consensus médical permet d'établir le diagnostic de SEP. Les critères actuels, qui font intervenir l'IRM, permettent un diagnostic plus sûr et plus précoce que les seuls critères cliniques.

L'interprétation des données IRM fait appel aux notions de dissémination spatio-temporelle. La dissémination spatiale se comprend comme la présence, sur un examen donné, d'une ou plusieurs lésions localisées en divers endroits du système nerveux central (cerveau, moelle épinière). Certaines localisations, comme par exemple des lésions situées en périphérie des

ventricules, ont un poids particulier pour évoquer un diagnostic de SEP. La dissémination temporelle est présente lorsque des examens réalisés à plusieurs mois d'intervalles (au minimum) montrent un nombre de lésions en évolution (augmentation ou régression).

Ces notions de dissémination sont à la base des critères retenus dans la pratique médicale lors du diagnostic de SEP. Ils sont explicités dans l'encadré suivant, qui présente les critères aujourd'hui en vigueur.



### 2.3. Evolution et pronostic

L'IRM conventionnelle, dans son état actuel de développement, se révèle peu informative pour l'établissement du pronostic. C'est pourquoi le recours aux examens IRM une fois le diagnostic posé est très limité.

Des espoirs résident dans les nouvelles techniques d'IRM aujourd'hui à l'étude.

## 2.4. Nouvelles techniques d'IRM

Il est bien établi que des lésions de la SEP peuvent affecter la substance blanche cérébrale sans être visibles à l'IRM conventionnelle. De nouvelles techniques apparaissent pour mettre en évidence ces anomalies, avec pour perspective le suivi de l'évolution de la maladie et de l'efficacité des traitements.

L'IRM conventionnelle est en constante évolution. L'augmentation du champ magnétique permet dès maintenant d'accéder à des détails plus fins dans l'image, avec une épaisseur de coupe de 1 mm ou inférieure. Ainsi l'IRM à 3 Tesla, et plus, permet la visualisation de lésions dans la substance grise et promet l'établissement de diagnostic plus précoce chez les patients présentant un syndrome cliniquement isolé.

Par ailleurs, des techniques nouvelles, qui sont étudiées depuis deux décennies en laboratoire, pourraient faire leur entrée dans la pratique hospitalière à plus ou moins court terme. Cette échéance est conditionnée par leur validation à travers de nombreux tests statistiques et l'établissement de procédures consensuelles comme cela a été réalisé pour l'IRM conventionnelle.

### 2.4.1. La spectroscopie

La fréquence de résonance des protons est légèrement modifiée par la présence du nuage d'électrons dans les atomes. Cette modification que l'on appelle **déplacement chimique** dépend de la nature de l'atome ou de la molécule. La mesure précise de la fréquence de résonance des protons permet d'identifier certains **métabolites** (produit de la transformation d'une substance de l'organisme) dans les tissus et d'en quantifier l'abondance relative.

Divers métabolites sont des marqueurs de l'activité des lésions de la SEP et des modifications pathologiques de la substance blanche. Ainsi la molécule NAA (N-acétyl-aspartate) qui est liée au fonctionnement neuronal est particulièrement utilisée. Il a été trouvé que la concentration de NAA suit l'activité des lésions visibles et « silencieuses » et peut permettre le contrôle de l'évolution de la maladie et de l'efficacité des traitements. La diminution de la concentration en NAA dans les tissus cérébraux est corrélée à la dégénérescence axonale.

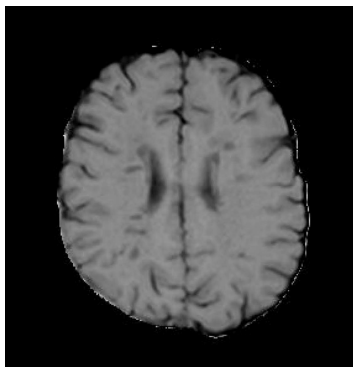
### 2.4.2. Le transfert d'aimantation

La détection de lésions « silencieuses » à l'IRM conventionnelle peut être obtenue grâce à la technique IRM de **transfert d'aimantation**.

#### **Définition : Le transfert d'aimantation**

Les protons de l'eau, dite « libre », sont excités à une fréquence de résonance précise. L'eau peut aussi être « liée » dans les macromolécules des tissus biologiques. Ses protons résonnent à des fréquences différentes de celle des protons de l'eau libre. Une partie d'entre eux peuvent être excités grâce à une application de l'onde RF de fréquence légèrement différente de celle des protons de l'eau libre, faisant apparaître une aimantation « liée ». Ensuite, un transfert d'aimantation vers les protons de l'eau libre se produit, car l'eau libre et liée sont en échange, ce qui peut être détecté à la fréquence « libre ». L'intensité de ce transfert, que l'on appelle rapport de transfert d'aimantation (MTR en anglais) est un marqueur qui se révèle sensible à des modifications pathologiques de la substance blanche, pouvant évoluer en lésions visibles à l'IRM conventionnelle.

Par rapport à l'IRM conventionnelle, le transfert d'aimantation offre une plus grande spécificité pour la myéline. Le rapport de transfert d'aimantation (**MTR**) est déterminé par l'abondance de la myéline. Cette dernière étant plus abondante dans la substance blanche, le contraste avec la substance grise est « naturel » dans ces images.



**Légende** : Image de transfert d'aimantation. Les plaques grises dans la substance blanche indiquent des pertes de myéline.

Il est observé que le MTR est bien corrélé avec le niveau de démyélinisation dans les lésions SEP. Un MTR réduit dans des régions apparaissant normales est un signe des processus de démyélinisation en cours.

Le transfert d'aimantation est une technique de plus grande spécificité que l'IRM conventionnelle pour le suivi des processus de dé/remyélinisation et la détection des pathologies silencieuses.

### 2.4.3. L'IRM de diffusion

Dans le même but, l'**IRM de diffusion** permet de déceler des anomalies dans la substance blanche d'apparence « normale ».

#### **Définition : L'IRM de diffusion**

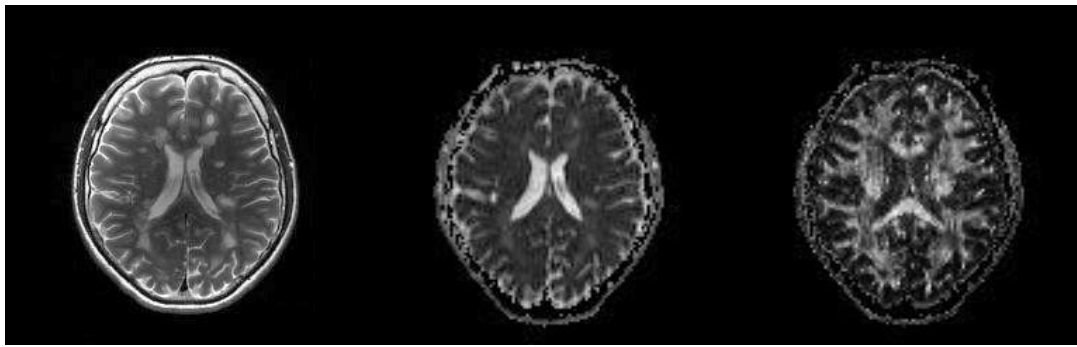
Alors que l'IRM conventionnelle délivre une seule information par voxel (temps de relaxation T1 ou T2, ou densité de protons), l'IRM de diffusion permet d'accéder à des informations plus riches relatives à la mobilité des protons, c'est à dire à la plus ou moins grande facilité pour l'eau de se déplacer dans les tissus. Pour cela des combinaisons particulières de champs magnétiques dans les trois directions de l'espace sont appliquées en séquence. Un traitement informatique détermine alors des quantités telles que la *mobilité moyenne* de l'eau et la *mobilité directionnelle* selon les directions sagittale, coronale et axiale.

Les mouvements de l'eau dans les tissus sont influencés par la présence d'obstacles tels que les parois des vaisseaux ou les membranes cellulaires. La mesure de ces mouvements et les images en résultant renseignent sur l'architecture 3D des tissus normaux et pathologiques.

Cette technique est unique pour la visualisation des faisceaux de fibres nerveuses dans la substance blanche.

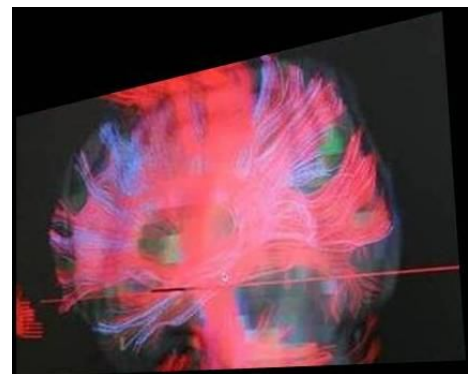
Cette technique permet de mesurer les mouvements de l'eau dans les tissus et de mettre en évidence la présence de processus pathologiques silencieux. On constate généralement une augmentation de la mobilité de l'eau dans les lésions hypo-intenses en T1, ce qui reflète l'augmentation des espaces libérés pour l'eau comme conséquence du processus de démyélinisation. Dans ces mêmes lésions la capacité de direction des mouvements de l'eau se trouve réduite, traduisant la destruction de l'architecture des faisceaux nerveux.

L'IRM de diffusion est particulièrement prometteuse pour la détermination des degrés de démyélinisation (ou de remyélinisation) et de perte axonale en relation avec les déficits moteurs ou cognitifs observés cliniquement.



Légende : Images obtenues sur un même sujet par IRM conventionnelle T2 (à gauche), et par IRM de diffusion : répartition des coefficients de diffusion moyens caractérisant le degré de mobilité de l'eau (au centre) ; répartition de la fraction d'anisotropie exprimant le degré d'orientation commune des fibres nerveuses en un point donné (à droite). Crédit photo : N. Wiest-Daesslé (PhD), Plateforme Neurinfo / Service de Neurologie - CHU Rennes.

**Légende** : Visualisation des fibres nerveuses par IRM de diffusion : coupe sagittale d'un cerveau avec superposition de faisceaux de fibres nerveuses. En rouge chez des sujets contrôles, en bleu chez des sujets SEP. Crédit photo : Laboratoire Visage, Rennes, France.



#### 2.4.4. IRM fonctionnelle

La compréhension des relations entre les lésions SEP et les fonctions neuro-motrices ou cognitives bénéficie des apports de l'**IRM fonctionnelle** (IRMf).

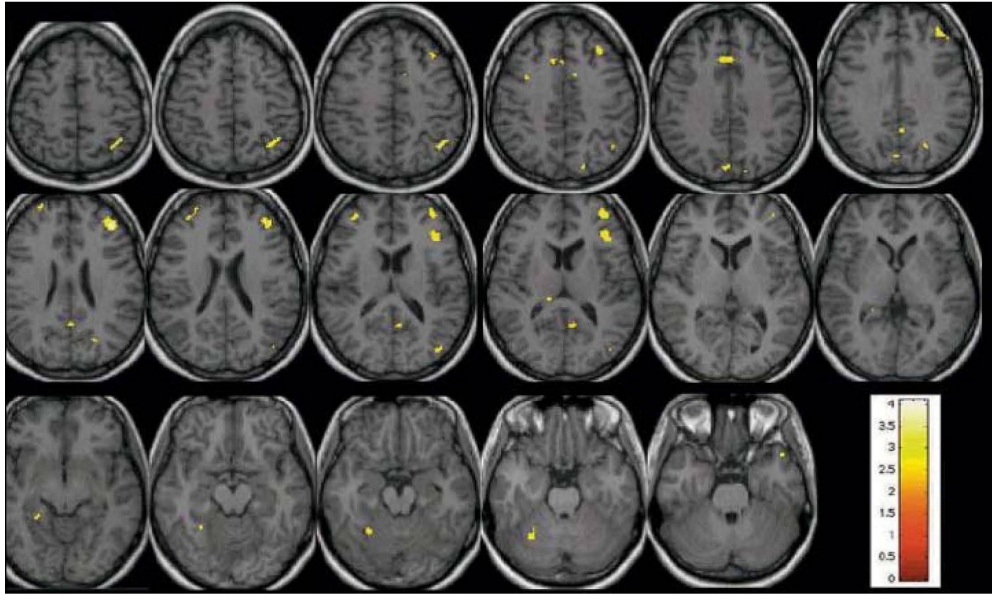
##### **Définition : L'IRM fonctionnelle**

L'oxygène est apporté à l'organisme par l'hémoglobine du sang, qui est une molécule contenant du fer. L'hémoglobine existe sous forme d'oxyhémoglobine et de désoxyhémoglobine avec des propriétés magnétiques différentes.

Le fonctionnement cérébral se traduit par une augmentation locale du débit sanguin dans les zones activées. Cette augmentation excède les besoins en oxygène des tissus et se traduit par une augmentation de la concentration d'oxyhémoglobine dans la région examinée. Les propriétés magnétiques de l'oxyhémoglobine entraînent de petites variations locales du champ magnétique qui deviennent décelables par leur effet sur les protons avoisinants. C'est le principe utilisé dans l'IRM fonctionnelle, qui permet de dresser des images représentatives de l'activité cérébrale.

Cette technique utilise les variations de débit sanguin dans les vaisseaux lorsque le cerveau est sollicité pour des tâches particulières (visuelles, auditives, motrices etc.). L'hémoglobine contenue dans le sang joue le rôle d'agent de contraste naturel. Des images des zones mises en jeu peuvent ainsi être obtenues.

Les études récentes montrent le rôle de la plasticité cérébrale, c'est à dire de l'adaptation d'aires cérébrales nouvelles pour la modération des déficits fonctionnels dans les phases initiales de la SEP.



**Légende :** Visualisation par IRMf d'aires cérébrales activées lors de tests de calcul mental.

## Glossaire

### Densité de protons

Se dit d'une image IRM obtenue en optimisant les paramètres de manière à obtenir un contraste reflétant la teneur en eau des tissus.

### Déplacement chimique

Phénomène d'écran produit par les électrons des atomes, modifiant la fréquence de résonance des spins nucléaires. Sa mesure en spectroscopie par résonance magnétique permet d'identifier les espèces chimiques en présence (ex. NAA ou N-acétylaspartate).

### Gadolinium

Produit de contraste utilisé en imagerie conventionnelle pour renforcer les images.

### IRM de diffusion

Technique d'IRM avancée qui permet l'étude de la mobilité de l'eau dans les tissus ainsi que la cartographie des réseaux de fibres nerveuses, notamment dans la substance blanche.

### IRM fonctionnelle

Technique d'IRM avancée qui permet la visualisation des régions cérébrales activées lors de la réalisation de tâches particulières. Cette technique utilise l'influence magnétique de l'hémoglobine du sang, contenant du fer, sur la résonance magnétique des protons de l'eau.

### Métabolites

Molécules présentes dans les cellules de l'organisme et participant à son fonctionnement. Dans le système nerveux, la NAA (N-acétylaspartate) est un marqueur du fonctionnement des neurones utilisé dans la spectroscopie par résonance magnétique.

### MTR

De l'anglais Magnetization Transfer Ratio ou rapport de transfert d'aimantation. Quantité mesurée par la technique IRM du transfert d'aimantation et qui est indicatrice de modifications pathologiques de la substance blanche.

### Onde radiofréquence

Onde électromagnétique émise par une antenne insérée dans un circuit électrique oscillant. Ce sont ces ondes qui véhiculent la radio, la télévision ou les communications du téléphone mobile. Dans l'IRM, ces ondes servent à exciter les spins des protons et à recueillir le signal de relaxation. Les fréquences radio utilisées dépendent de l'intensité du champ magnétique imposé. Pour un champ magnétique de 1,5 Tesla la fréquence est de 63 millions de Hertz (1 Hertz = 1 oscillation par seconde) ou 63 MHz.

### Pondération

Ajustement des paramètres d'une séquence d'acquisition IRM afin de privilégier un type de relaxation par rapport à un autre.

### Précession

Le spin du proton tourne autour de l'axe du champ magnétique à la manière d'une toupie. Ce mouvement possède une fréquence précise liée à la nature de la particule et à l'intensité du champ magnétique (fréquence de Larmor).

### Relaxation

Phénomène par lequel les spins des protons reviennent à leur état d'équilibre après une excitation par l'onde de radiofréquence. La relaxation s'accompagne de l'émission d'une onde de même fréquence que l'onde d'excitation.

## Résonance magnétique

Technique née dans les années 1940 permettant de manipuler les spins des matériaux au moyen d'ondes de radiofréquences. Cette technique a de nombreuses applications en analyse chimique et en biologie. Elle est à la base de l'imagerie IRM.

## Séquence

Enchaînement des processus nécessaires à l'obtention d'une image IRM. Une séquence type comprend des variations de champ magnétique dans les 3 directions de l'espace, et des impulsions de radiofréquence. Il existe de nombreuses séquences visant notamment à raccourcir le temps d'acquisition des images.

## Spin

Propriété quantique des particules atomiques qui peut être associée à leur rotation sur elles mêmes. Le spin des protons et des électrons ne possède que deux états, que l'on désigne par « haut » et « bas ». Une onde de radiofréquence permet de manipuler l'état de spin d'une particule.

## Supraconduction

Propriété de certains métaux (comme le niobium) ou de certaines céramiques de n'offrir aucune résistance au courant électrique lors qu'ils sont refroidis à très basse température. Ce sont des bobines supraconductrices refroidies à l'hélium liquide qui équipent l'aimant principal des scanners IRM.

## T1

T1 désigne le mode de relaxation longitudinal, c'est à dire parallèle à l'axe du champ magnétique principal. Une séquence pondérée en T1 délivre une image en contrastes anatomiques, ce qui signifie que la substance grise apparaît plus sombre que la substance blanche.

## T2

T2 désigne le mode de relaxation transversal, c'est à dire perpendiculaire à l'axe du champ magnétique principal. Une séquence pondérée en T2 délivre une image en contrastes inversés.

## Tesla

Unité de mesure du champ (en toute rigueur « induction ») magnétique. Elle vaut environ 30 000 fois le champ magnétique terrestre. Une bobine IRM de 1,5 Tesla produit un champ valant 45 000 fois celui du champ terrestre.

## Tomographe ou scanner IRM

Appareil d'imagerie médicale utilisant le phénomène de résonance magnétique nucléaire pour produire des images du corps et des organes in vivo, de manière non intrusive et non irradiante.

## Transfert d'aimantation

Technique d'IRM avancée ayant une spécificité particulière pour la détection de la myéline.

## Voxel

C'est le volume élémentaire, généralement assimilé à un petit parallélépipède, accessible à la mesure IRM. Dans les appareils hospitaliers courants, ce volume est de 3X1X1 mm.